

УДК 537.8

ИЗЛУЧАТЕЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В АТМОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2021 г. М. В. Ефанов¹, Е. Ф. Лебедев¹, *, А. В. Ульянов¹, В. М. Федоров¹, М. А. Шурупов¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: lebedev@ihed.ras.ru

Поступила в редакцию 08.09.2021 г.

После доработки 04.10.2021 г.

Принята к публикации 23.11.2021 г.

Создан и отработан в предварительных экспериментах излучательный и измерительный комплексы для исследования деформации сверхширокополосных импульсов в атмосфере и ионосфере Земли. Сверхширокополосные модули, объединенные в синхронизированные активные антенные решетки, совместно с разработанной квазирупорной антенной повышенной чувствительности позволяют проводить исследования на расстояниях более десятков километров и получать новые данные для различных практических применений.

DOI: 10.31857/S0040364421060028

ВВЕДЕНИЕ

Сверхширокополосные (СШП) электромагнитные импульсы радиочастотного диапазона привлекают в последнее время внимание разработчиков новой электронной техники из-за преимуществ, связанных с шириной спектра, достигающей единиц гигагерц. Именно это свойство обеспечивает, в частности, возможность визуализации объектов при СШП-локации, зондирования поверхности Земли, а также многоканального и многочастотного проникновения наведенных СШП-сигналов помехи внутрь экранированных корпусов, содержащих электронные системы управления.

В ряде работ, например [1–7], рассмотрены общие вопросы прохождения электромагнитных импульсов радиочастотного диапазона в неоднородных и нелинейных средах. Опубликованные работы выявили искажения импульсов из-за поглощения и дисперсии при распространении в свободной атмосфере вследствие резонансного воздействия на молекулы и в загрязненной атмосфере из-за дождя и примесей [8–12], а также в ионосфере из-за взаимодействия с электронами, в том числе в замагниченной плазме [2, 13–20]. Рассмотрены также проблемы искажения импульсов при распространении вдоль земной поверхности, в том числе с растительностью [21–30].

Однако экспериментальное подтверждение этих результатов проведено в малой части публикаций [21, 23, 27, 29, 30], причем некоторые из них посвящены узкополосным СВЧ-сигналам, что оказа-

лось необходимым для понимания процессов резонансного поглощения и рассеяния в различных средах. Малое число и фрагментарность выполненных опытов с СШП-сигналами препятствует надежному их использованию при новых технических разработках.

Наименее изученными являются вопросы прохождения СШП-сигналов в атмосфере. Две расчетные работы [9, 12], основанные на учете изменения амплитуды спектральных линий СШП-сигналов при резонансном поглощении молекулами воздуха, показывают, что заметное искажение зависимости импульсов от времени начинается с длительностей менее 50 пс и дальностей 10 км и более. Как раз такие длительности имеют значение для практических применений из-за малых размеров апертур излучающих антенн и пригодности для зондирования поверхностного покрова Земли с больших высот. Однако прямые эксперименты с использованием СШП-импульсов в атмосфере отсутствуют, а могли бы существенно расширить представления о реальной деформации сигналов.

Неизвестны также какие-либо эксперименты по прохождению СШП-сигналов в ионосфере, хотя в теоретических работах [13–20] прогнозируются заметные воздействия из-за неоднородностей вдоль трасс длиной в десятки и сотни километров.

Поэтому комплексные исследования прохождения СШП-сигналов в атмосфере и ионосфере Земли могут способствовать принятию обоснованных решений по применению СШП-сигналов в новых технологиях.

Постановка и реализация таких экспериментов в реальных условиях в атмосфере (и особенно в ионосфере) являются сложной и дорогостоящей задачей. Поэтому разработка оптимального излучательного (достаточной мощности) и измерительного (необходимой чувствительности) комплексов (с учетом заметного уменьшения амплитуд сигналов на больших дальностях и влияния наземных условий на распространение волны по трассе излучатель—измеритель) требует тщательной последовательности в подготовке и организации экспериментов.

Описываемые в статье разработки и проведенные начальные эксперименты в свободной атмосфере на практически интересных расстояниях (до 10 км) предусматривают поэтапное системное исследование с наращиванием числа синхронизированных СШП-модулей и, соответственно, увеличением расстояний просвечивания для преодоления потери амплитуды измеряемых сигналов и превышением ее над уровнем отраженных от земной поверхности шумов.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТАНОВКЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В АТМОСФЕРЕ

В связи со стратификацией параметров атмосферы Земли с высотой первоначальные исследования целесообразно проводить вдоль земной поверхности по траектории с параметрами, близкими к однородным. Одновременный подъем излучателя и измерителя на заметные высоты, на которых влияние земной поверхности было бы исключено, фактически удваивает затраты и вносит дополнительные трудности юстировки диаграмм направленности. Еще одним ограничением является предельный подъем самого доступного из воздушных носителей (привязного аэростата) на высоты 100–300 м при полезной нагрузке (оборудование, пилот и один-два оператора) массой 250 кг. В связи с этим масса разработанных в данной работе СШП-излучателей составляет менее 100 кг, масса измерителя — 80 кг.

Возможны два варианта размещения в таких опытах с аэростатом системы излучатель—измеритель.

В одном варианте излучатель размещается в корзине воздушного шара, измеритель — на доступной для обслуживания высоте над поверхностью земли (например, 3–10 м). Ограничение по санитарным нормам на присутствие операторов и пилота в непосредственной близости от СШП-излучателя лимитирует время включения единицами секунд, что снижает вероятность надежной юстировки и регистрации на земле сигнала приемником измерителя. Более важное ограничение связано с большим размером площади, занимаемой отраженным от земной поверхности сигналом, — до сотни

метров при расстоянии 10 км (при ширине диаграммы направленности излучателя 5° и более).

Предпочтительным является размещение измерителя в корзине воздушного шара, а излучателя — на доступной для обслуживания высоте 3–10 м над поверхностью земли. В этом случае измеритель виден с места установки излучателя под углом 3° – 5° , сравнимом с шириной диаграммы направленности разработанного излучателя $3 \times 3 (\pm 5^\circ)$, и влияние земной поверхности будет уменьшено. Расположенные в корзине измерительная полосковая линия ИППЛ (диаграмма шириной более $\pm 90^\circ$) и более чувствительный измерительный СШП-раскрыв (диаграмма шириной $\pm 30^\circ$) получают отраженный от земной поверхности помеховый сигнал малой амплитуды. Санитарные нормы при расположении оператора на земле выполняются удалением на необходимое расстояние от излучателя с помощью применения оптронных развязок в системе управления.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТАНОВКЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В ИОНОСФЕРЕ

Эксперименты по прохождению СШП-сигналов в ионосфере требуют специальной подготовки и организации в связи с необходимостью применения спутниковых или ракетных носителей и значительной дороговизны. Наиболее доступным вариантом является использование метеорологических ракет типа МР-300, рассчитанных на полезную нагрузку до 150 кг при максимальной высоте подъема 300 км. Кроме того, имеется практический опыт запусков аналогичных ракет прежнего поколения МР-12 на высоты около 140 км [31, 32]. Эксперименты в ионосфере требуют их подготовки кооперацией организаций нескольких ведомств (обслуживание запусков, траекторные измерения в полете, модернизация ракеты под конкретную нагрузку). Стоимость работ может достигать несколько сотен миллионов рублей по сравнению с относительно недорогими опытами в атмосфере (менее десяти миллионов).

Реализация ракетного эксперимента в ионосфере может быть аналогичной эксперименту “Флак-сус” [31] с активным плазменным воздействием на ионосферу. В опытах с СШП-излучателем он размещается в головной части ракеты с ориентацией антенны на Землю. При достижении ракетой апогея головная часть отстреливается и удаляется от ракеты на километровое расстояние для полета по отдельной траектории падения. Предпринимаются меры для ориентации СШП-антенны на полигон, на котором размещается измерительный комплекс на основе сборок ИППЛ-1, квазирупорного раскрыва и осциллографа. Идет регистрация сигнала на всем пути снижения излучателя. На высоте около 60 км выбрасывается тормозной парашют, обеспечивающий дополнительную стабили-

зацию на Землю. Вблизи поверхности Земли выдвигаются штанги порохового торможения, что может способствовать сохранению излучателя для подготовки к следующему пуску. Квазирупорная антенна приемника обеспечивает чувствительность к СШП-сигналу на уровне 40 В на его входе на каждый киловольт на метр падающей напряженности электрического поля, поэтому приемник способен регистрировать сигналы на всей траектории длиной 300 км (при запуске излучателя 3×3 с параметром $U_{\text{rad}} = ER = 100$ кВ). ИППЛ с чувствительностью 0.3 В на каждый киловольт на метр напряженности электрического поля начинает регистрацию с высоты около 5 км.

Для получения надежных данных целесообразно иметь возможность проведения, по крайней мере, двух запусков. В отличие от экспериментов в атмосфере ракетные пуски требуют специальной подготовки СШП-аппаратуры, рассчитанной на вибрации, и ускорений до 20g.

РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СШП-СИСТЕМЫ

СШП-излучатели, в том числе с полупроводниковыми генераторами импульсных токов, достаточно широко используются для исследований и разработок в отечественной и зарубежной практике. Научно-производственная компания “ФИД-техника” (Санкт-Петербург) разработала и выпускает [33] тиражом в десятки экземпляров в год практически весь необходимый для исследований набор генераторов тока. Генераторы сделаны в модульном исполнении с разной номенклатурой импульсов: длительность от 50 пс до 1 нс, с частотой следования от 1000 до 100000 импульс/с. Частота следования импульсов ограничена средней мощностью около 200 Вт полупроводникового коммутирующего прибора. Масса таких генераторных модулей тока составляет всего около 3 кг при импульсной электрической мощности от 2 до 200 МВт (зависит от амплитуды выходного напряжения от 2 до 100 кВ и частоты следования импульсов).

Вес аппаратуры излучающего СШП-модуля, построенного на этих генераторах тока (вместе с апертурной антенной, аккумулятором на 20 мин автономной работы и блоком управления), составляет около 10 кг. Такие энергетические удельно-весовые параметры СШП-излучателей на порядок превышают характеристики электромагнитных излучателей, использующих искровые разрядники, что позволяет размещать их на носителях для проведения экспериментов не только в атмосфере, но и в ионосфере. Основные сведения о созданных и проектируемых СШП-излучателях, в том числе объединенных в синхронизированные активные антенные решетки, изложены в публикациях [34–42].

В основу созданной СШП-излучательной системы для исследования деформации импульсов в атмосфере положен модуль (рис. 1), имеющий длительность импульсов около 50 пс, которая не-

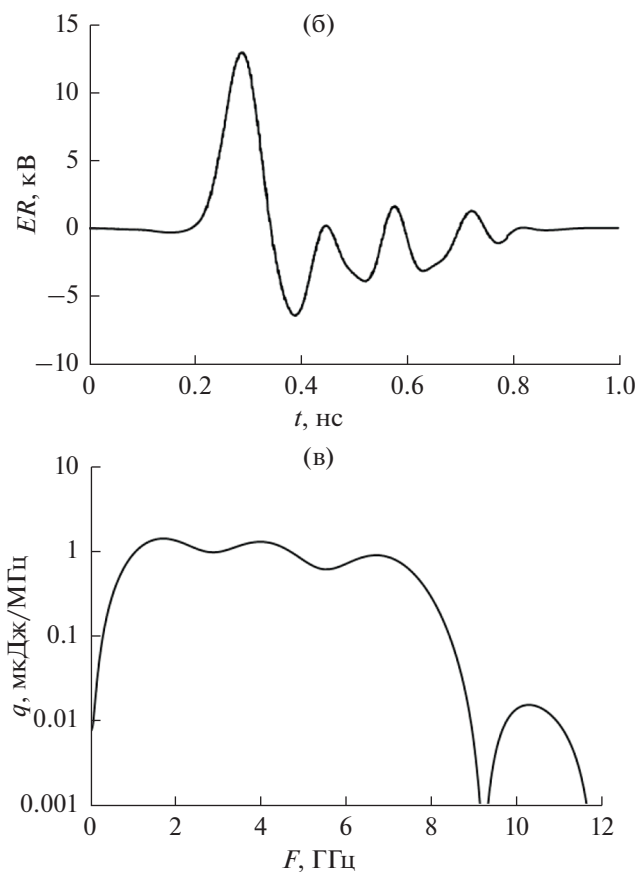
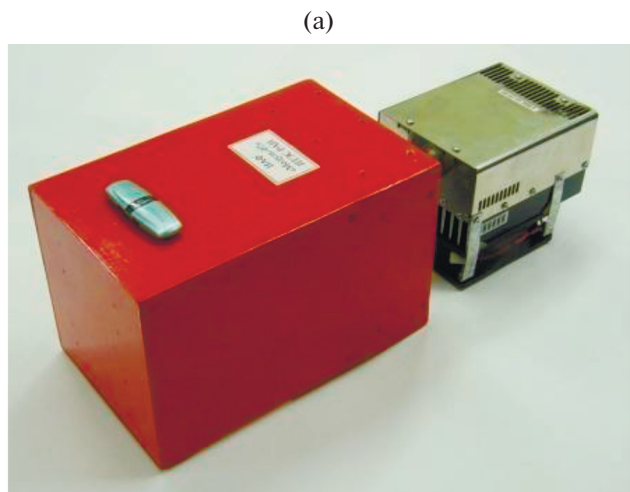


Рис. 1. Фотография опорного модуля (а), используемого в экспериментах (электродинамический потенциал $U_{\text{rad}} = ER = 13$ кВ, масса – 10 кг, размер излучающей апертуры – 16×16 см²), осциллограмма напряженности электрического поля (б) и спектральная плотность энергии излученного импульса (в).

обходима для проверки основного расчетного результата работы [12].

Объединение таких модулей в синхронизированные антенные решетки позволяет проводить эксперименты в атмосфере на дистанциях до 10 км, когда обеспечивается еще возможность визуальной юстировки диаграмм направленности и структура импульса может регистрироваться разработанным измерительным комплексом. Кроме того, на этом расстоянии может быть преодолено влияние на диаграмму направленности кривизны Земли при подъеме приборов на доступную высоту 100–300 м.

Для экспериментов в полевых условиях созданы три СШП-излучателя:

- одиночный модуль с диаграммой направленности около $\pm 15^\circ$ с электродинамическим потенциалом $U_{\text{rad}} = ER = 13$ кВ для проведения предварительных настроечных экспериментов;

- сборка 2×2 модулей с апертурой 45×40 см² массой 50 кг с электродинамическим потенциалом около 50 кВ с ручной подстройкой синхронизации и диаграммой направленности $\pm 10^\circ$ для предварительных экспериментов по влиянию земной поверхности и прохождению СШП-сигналов;

- сборка 3×3 модулей с апертурой 55×55 см² и массой 100 кг с электродинамическим потенциалом около 100 кВ с автоподстройкой синхронизации с диаграммой направленности $\pm 5^\circ$ для зачетных экспериментов на дальностях до 10 км и более с подъемом оборудования на высоты до 100–300 м.

Многоканальная система запуска и синхронизации разработана научно-производственной компанией “ФИД-Техника”. Система автоподстройки синхронизации выполнена с применением аналоговых формирователей задержек и блока контроля и подстройки в составе блока запуска и синхронизации системы. Возможность высокоточной синхронизации излучения отдельных модулей достигается за счет использования обратной связи с выходов генераторов высоковольтных импульсов. Точность установки задержек отдельных каналов составляет 10 пс, среднеквадратичная нестабильность задержек каналов – менее 8 пс.

РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В основу измерительной системы положены сертифицированная измерительная линия ИППЛ-1 [41], сверхширокополосный раскрыв и осциллограф реального времени с полосой около 10 ГГц.

Оценка чувствительности сборки ИППЛ–осциллограф проводилась с учетом следующих измеренных при выполнении работы данных: 10 мВ размаха сигнала на экране требуют на входе осциллографа амплитуды 10 мВ, коэффициент преобразования ИППЛ равен около 0.4 В на выходе на 1 кВ/м падающего на него электромагнитного

поля. Следовательно, для получения размаха сигнала, равного 10 мВ на экране, достаточно для обработки с точностью порядка 10%, необходимо иметь в проходящей электромагнитной волне на входе ИППЛ электрическое поле с амплитудой $(10 \text{ мВ/м}) / [(400 \text{ мВ/м}) / (1 \text{ кВ/м})] = 25 \text{ В/м}$. Сборка 3×3 с $U_{\text{rad}} = ER = 100$ кВ создаст такую напряженность 25 В/м электрического поля на расстоянии 4 км.

В связи с этим для экспериментов на расстояниях 10 км и более, проводимых с излучателем 3×3 , для решения поставленной задачи разработан сверхширокополосный измерительный рупор с апертурой 16×16 см², имеющий на два порядка большую чувствительность, чем ИППЛ-1.

Для реализации такой антенны-сенсора с большой чувствительностью была разработана и изготовлена импульсная квазирупорная сверхширокополосная антенна (КР-СШП-антенна). Разработке антенны предшествовали лабораторные эксперименты с моделями антенны и расчетно-аналитические исследования с использованием численного трехмерного полностью электромагнитного кода КАРАТ [43], применяемого в практических задачах релятивистской СВЧ-электроники и прикладной электродинамики. Пример расчета кодом КАРАТ на компьютере (CPU 4.0 GHz, DRAM 64GB) распространения импульса электромагнитной волны в приемной антенне типа экранированный полурупор дан в работе [42]. Элемент антенны в виде экранированного полурупора представляет одну восьмую часть четырехрупорной КР-СШП-антенны. Данный тип антенны, разработанный в различных модификациях, применяется достаточно успешно для излучения мощных электромагнитных импульсов короткой длительностью менее одной наносекунды. Согласно известному в теории антенн [44] принципу взаимности, квазирупорная антенна может использоваться также как приемная СШП-антенна. Эффективная высота (или чувствительность) такой антенны в режиме приема равна нескольким сантиметрам, что на два порядка больше эффективной высоты полосковой антенны-сенсора типа ИППЛ. На рис. 2 представлены фотография и схема устройства сенсора КР-СШП-антенна, а на рис. 3 – ИППЛ-1 и схема его устройства.

Как видно из рис. 2, квазирупорная измерительная (приемная) антенна представляет собой четырехрупорную синхронную антенную решетку. Похожее устройство имеют используемые в экспериментах и импульсные излучающие четырехрупорные антенные решетки, каждая из которых возбуждается своим генератором импульсных напряжений. Более подробно устройство антенн описано в [42].

Определение коэффициента чувствительности измерительного приемного СШП-квазирупора. Ко-

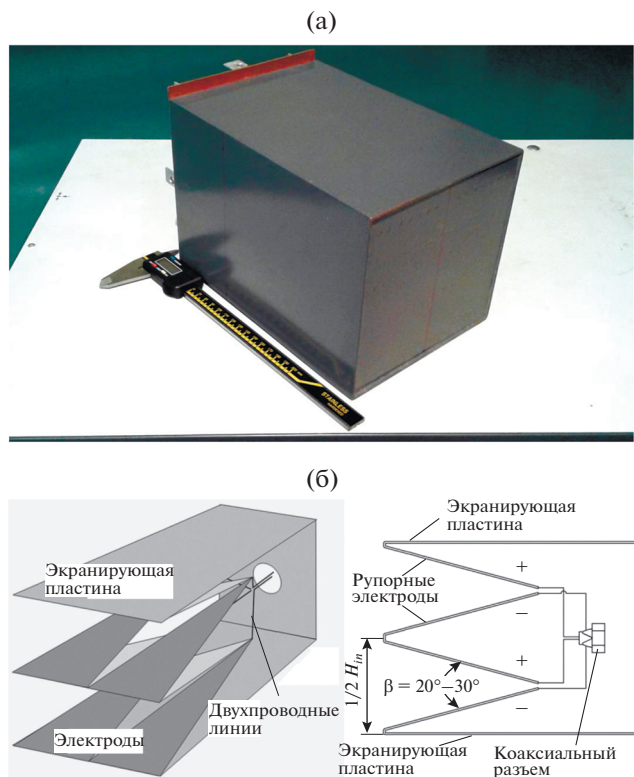


Рис. 2. Измерительная КР-СШП-антенна (а) в составе канала регистрации напряженности электромагнитного поля и схема ее устройства (б).

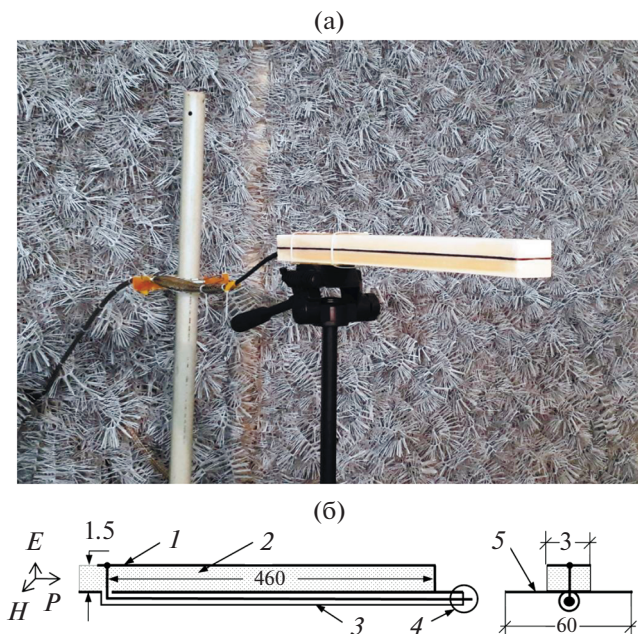


Рис. 3. Измерительная полосковая линия ИППЛ-1 (а) и схема ее устройства: (б) – вид сбоку, (в) – вид спереди; 1 – сигнальный электрод, 2 – разделительный диэлектрик, 3 – высокочастотный кабель к цифровому регистратору, 4 – коаксиальный разъем, 5 – опорная пластина.

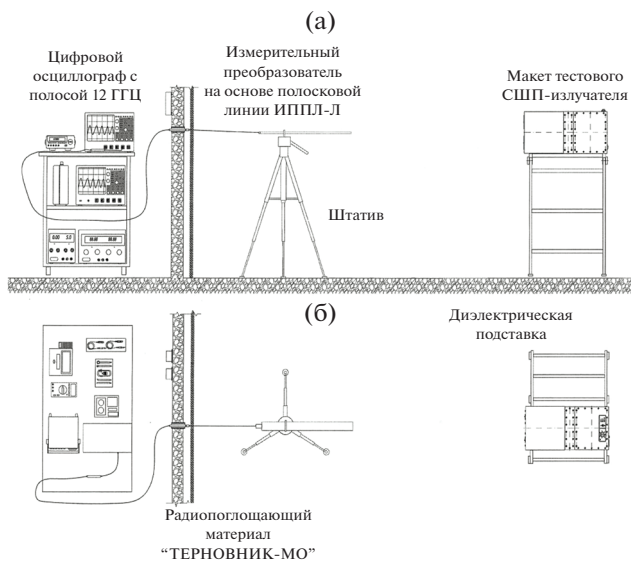


Рис. 4. Схема размещения тестового СШП-излучателя (с правой стороны) и регистрирующей аппаратуры (на штативе показан ИППЛ-1): (а) – вид сбоку, (б) – вид сверху.

эффицент чувствительности такого измерительного приемного квазирупора для СШП-сигналов длительностью порядка 50 пс удобнее всего определить методом прямого сравнения при регистрации одних и тех же СШП-сигналов с помощью, например, измерительного преобразователя на основе полосковой линии ИППЛ-1, который прошел сертификацию и его чувствительность уже определена. Была использована измерительная композиция, показанная на рис. 4 (виды сбоку и сверху).

Расстояние между излучающей и приемной апертурами составляло $R = 8.1$ м в случае ИППЛ-1. Электродинамический потенциал $U_{rad} = ER$ для тестового СШП-излучателя был равен 11.4 кВ. Чувствительность вертикальной развертки осциллографа установлена на уровне 100 мВ на деление, коэффициент чувствительности ИППЛ-1 равен 0.38 В/(кВ/м). Зарегистрированная осциллограмма напряженности импульсного электрического поля вертикальной поляризации приведена на рис. 5.

Затем вместо ИППЛ-1 на штатив помещался сенсор КР-СШП-антенна, тестовый излучатель и приемный рупор соосно выравнивались и регистрировался сигнал излучения. Параметры измерительной системы были следующие:

- расстояние между излучающей и приемной апертурами $R = 8.54$ м;
- тестовый СШП-излучатель имел $U_{rad} = ER = 11.4$ кВ;
- чувствительность вертикальной развертки осциллографа 100 мВ на деление;

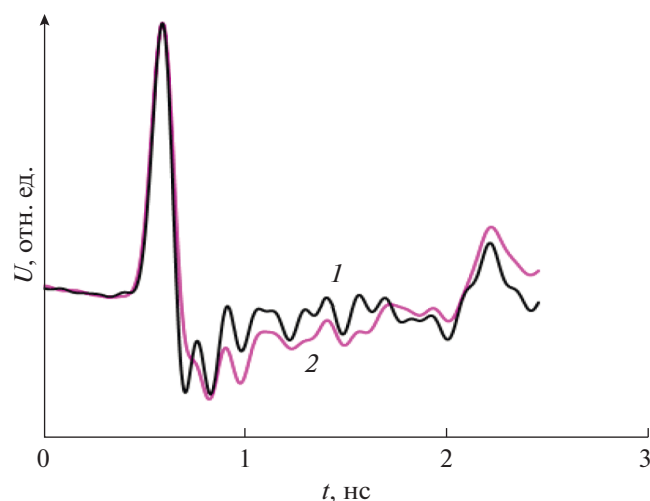


Рис. 5. Осциллограммы напряженности электрического поля, измеренные ИППЛ-1 (1) и КР-СШП-антенной (2, сигнал ослаблен в 90.5 раз).

— коэффициент ослабления аттенуаторов $k_{\text{ослаб2}} = 100$ (40 дБ).

Зарегистрированная осциллограмма напряженности поля с сенсором КР-СШП-антенна помещена (для удобства сравнения с ранее полученной осциллограммой для ИППЛ-1) на рис. 5 с дополнительным ослаблением в 90.5 раз. Коэффициент чувствительности КР-СШП-антенны-сенсора равен 34.4 В/(кВ/м).

Как видно из рис. 5, чувствительность нового сенсора КР-СШП-антенна превышает чувствительность ИППЛ-1 в 90.5 раз.

Таким образом, разработанная диагностическая система с ИППЛ и измерительным сенсором КР-СШП-антенна позволяет проводить измерения деформации сверхкоротких СШП-сигналов длительностью около 50 пс во всех запланированных в данной работе постановках.

ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ДИСТАНЦИИ 7 КМ

Предварительный эксперимент на дистанцию 7 км проведен с целью отработки методических вопросов постановки опытов в реальных полевых условиях и получения практического опыта использования подъемного шара с размещением на нем СШП-излучателя.

Технически возможным оказалось размещение СШП-излучателя сборки 2×2 с запиткой от бензоэлектрогенератора и двух операторов на борту воздушного шара (рис. 6).

В связи с ненадежностью ручной подстройки синхронизации в сборке 2×2 в опытах использовался режим включения только одного моду-

ля с $ER = 13$ кВ. Ориентация на антенну измерительной системы (расположена на высоте 4 м над уровнем земли) проводилась операторами визуально. Сначала проведен эксперимент на дистанции 4 км с подъемом на высоту 50 м с визуальной ориентацией антенн излучателя и измерителя друг на друга (рис. 7).

В следующей серии опытов подъем на высоту 100 м проводился на расстоянии воздушного шара от регистратора 7 км.

В качестве регистрирующей системы в первых экспериментах использовался несертифицированный узкополосный приемник на частоту 10 ГГц, соответствующий самой высокочастотной части спектра СШП-модуля с длительностью импульса 50 пс. Полоса пропускания от входного волновод-



Рис. 6. Размещение СШП-сборки 2×2 в корзине воздушного шара.



Рис. 7. Фотография привязного воздушного шара в эксперименте на расстоянии 4 км.

ного тракта до лампового диодного смесителя составляла около 100 МГц, полная чувствительность около 0.1–1 мкВ (двойное преобразование на частотах 70 и 10 МГц).

Амплитудный детектор приемника фиксировал приходящие от излучателя импульсы как с расстояния 4 км, так и с расстояния 7 км (в этом опыте напряженность электрического поля в районе размещения антенны на высоте 4 м от поверхности земли составляла 1.4 В/м).

Таким образом, в предварительных экспериментах подтверждено наличие регистрируемой составляющей спектра в районе 10 ГГц от излучателя с апертурным антенным раскрытием, возбуждаемым сверхкоротким импульсом напряжения с фронтом нарастания длительностью 50 пс. Получен необходимый экспериментальный опыт в постановке исследований в реальной атмосфере на требуемых для решения задачи дальностях. Показана возможность регистрации сигналов на расстояниях около 10 км в случае применения аэростата с подъемом на высоту 100 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные разработки и начальные эксперименты по прохождению СШП-импульсов в атмосфере Земли на расстояниях в единицы–десятки километров демонстрируют следующее:

– возможность проведения дальнейших исследований с полным числом синхронизированных модулей 3×3 , размещенных на земле;

– подъем измерительной системы с измерительной линией ИППЛ и квазирупорным СШП-раскрытием на привязном аэростате на высоту сотни метров;

– возможность получения зачетных экспериментальных результатов по деформации импульсов длительностью 50 пс при прохождении их в однородной атмосфере.

Полученные данные могут являться опорными при дальнейших исследованиях в атмосфере и ионосфере Земли.

Авторы считают своим долгом отметить, что академик Фортон Владимир Евгеньевич (1946–2020) в последние годы жизни уделял большое внимание электрофизическим процессам в атмосфере и ионосфере Земли, в том числе инициированию молний и другим активным воздействиям на состояние этих сред [45]. Данная работа выполнена благодаря его стимулирующему влиянию.

Работе оказана финансовая поддержка грантом Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2020-790.

Авторы статьи пользуются случаем выразить благодарность заведующему лабораторией ОИВТ РАН Осташеву В.Е. за плодотворные научно-технические консультации, а также ведущему инже-

неру ОИВТ РАН Воробьеву В.Н. и аэронавту, слесарю механосборочных работ высшей категории ОИВТ РАН Мореву А.М. за практическую помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 685 с.
2. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177. № 11. С. 1145.
3. Грудзинская Г.П. Распространение радиоволн. М.: Высшая школа, 1975. 280 с.
4. Розенберг В.И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. М.: Росгидромет, 1972. 348 с.
5. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. К вопросу о расплывании импульсов в диссипативных и неравновесных средах // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 22. № 10. С. 1223.
6. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1990. 452 с.
7. Зеркаль А.Д. Вопросы практического использования системы ближней радиолокации на основе сверхкоротких импульсов с малым энергопотреблением // Журн. радиоэлектроники. 2012. № 1. <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/3/text.html>
8. Наумов Н.Д., Никольский В.А. Влияние дождя на искажение радиоимпульса // Успехи прикл. физики. 2017. Т. 5. № 1. С. 41.
9. Вечерук Г.В., Кондранин Т.В., Журавлев А.В. Исследование взаимодействия сверхширокополосных электромагнитных импульсов с вертикально стратифицированной атмосферой // Исследовано в России. Электр. журн. 2002. С. 1489.
10. Кравицов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. М.: Радио и связь, 1983. 223 с.
11. Иванченко В.А., Николаев В.В. Особенности распространения сверхкоротких импульсов в среде загрязнитель–атмосфера // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 19. С. 66.
12. Стадник А.М., Ермаков Г.В. Искажения сверхширокополосных электромагнитных импульсов в атмосфере Земли // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 7. С. 1009.
13. Наумов Н.Д. Дифракция радиоимпульсов в ионосфере // Прикл. физика. 2017. № 1. С. 5.
14. Гуляев Ю.В., Стрелков Г.М. Распространение сверхширокополосного радиоимпульса в холодной плазме // Докл. РАН. 2006. Т. 408. № 6. С. 754.
15. Касперович М.М., Кондратенко В.А. Влияния концентрации электронов в ионосфере на сверхширокополосные сигналы // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: II Междун. науч.-техн. конф. 4 дек. 2014. <https://rep.bntu.by/handle/data/12438>
16. Касперович М.М., Кондратенко В.А., Горшков С.А. и др. Коррекция искажений, возникающих при прохождении сверхширокополосных сигналов через ионосферу // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: III Междун. науч.-техн. интернет-конф. 20–21 нояб. 2015. <https://rep.bntu.by/handle/data/21953>

17. *Строев А.К.* Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки сверхширокополосных радиолокационных сигналов, позволяющих компенсировать их искажения при прохождении через неоднородную ионосферу. Дис. ...канд. физ.-мат. наук. М.: МФТИ, 2019. 119 с.
18. *Солдатов А.В., Терехин В.А.* Распространение сверхширокополосного электромагнитного сигнала в ионосферной плазме // *Физика плазмы*. 2016. Т. 42. № 10. С. 927.
19. *Пятаков Н.П., Солдатов А.В.* Аналитические решения некоторых задач дифракции сверхширокополосного электромагнитного излучения в высокочастотном приближении для уравнений Максвелла // *ВАНТ. Сер. Теор. и прикл. физика*. 2018. № 5. С. 41.
20. *Петренко П.Б., Бонч-Бруевич А.М.* Моделирование и оценка ионосферных искажений широкополосных радиосигналов в локации и связи // *Вопросы защиты информации*. 2007. № 3. С. 24.
21. *Болтинцев В.Б., Ильяхин В.Н., Безродный К.П.* Метод электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды // *Журн. радиоэлектроники. Электр. журн*. 2012. № 1. <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/14/text.html>
22. *Жиганов С.Н.* Модель отраженного от подстилающей поверхности сигнала // *Проектирование и технология электронных средств*. 2011. № 1. С. 52.
23. *Курангышев А.В., Дедушкин А.В., Казначеев А.В.* Оценка ослабления радиосигнала по методу идеальной радиопередачи с учетом влияния земной поверхности // *Молодой ученый*. 2016. № 3. С. 131.
24. *Жарко В.О., Барталев С.А.* Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 3. С. 159.
25. *Лурия Е.А., Мазуров А.А., Ершов Д.В. и др.* Спутниковый мониторинг лесов России // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20. № 5. С. 443.
26. *Якубов В.П., Тельпуховский Е.Д., Миронов В.Л. и др.* Векторное радиопросвечивание лесного полога // *Журн. радиоэлектроники. Электр. журн*. 2002. № 1. <http://jre.cplire.ru/win/jan02/1/text.html>
27. *Ветлужский А.Ю., Калашников В.П.* Экспериментальное исследование влияния растительности на распространение широкополосных сигналов // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 6. С. 1699.
28. *Ветлужский А.Ю.* Аппаратно-программный комплекс электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды. Автореф. дис. ...докт. физ.-мат. наук. Томск: Томск. политех. ун-т, 2015. 22 с.
29. *Гранков А.Г., Мильшин А.А., Чухланцев А.А., Шелобанова Н.К.* Спектральные измерения ослабления радиоволн кронами деревьев в природных условиях. Препринт ИРЭ РАН. М., 2004. 22 с.
30. *Подосенов С.А., Сахаров К.Ю., Соколов А.А.* Влияние поверхности земли на распространение сверхкоротких импульсов электромагнитного поля // *Технологии электромагнитной совместимости*. 2006. № 2. С. 50.
31. *Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Подгорный И.М. и др.* Взаимодействие плазменной струи с геомагнитным полем в геофизических ракетных экспериментах “Флаккус-1” и “Флаккус-2” // *Космические исследования*. 2000. Т. 38. № 3. С. 244.
32. *Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Подгорный И.М. и др.* Движение плазменной струи поперек геомагнитного поля в активном геофизическом эксперименте “North Star” // *Космические исследования*. 2003. Т. 41. № 1. С. 33.
33. <http://www.fidtechnology.com>
34. *Остаев В.Е., Ульянов А.В.* Сверхширокополосное излучение и угроза его воздействия на электронные технические средства. Препринт ОИВТ РАН. М., 2018. 119 с.
35. *Efanov V.M.* Gigawatt All Solid State Nano- and Picosecond Pulse Generators for Radar Applications // *Proc. 14th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Dallas, TX*, 2003. P. 100.
36. *Efanov V.M., Fedorov V.M., Grekhov I.V. et al.* Multiunit UWB Radiator of Electro-Magnetic Waves with Controlled Directional Pattern // *Proc. 13th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia. 25–29 July. 2004*. P. 262.
37. *Prather W.D., Baum C.E., Torres R.J. et al.* Survey of Worldwide High-Power Wideband Capabilities // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. 2004. V. 46. № 3. P. 335.
38. *Mesyats G.A., Rukin S.N., Shpak V.G., Yalandin M.I.* Generation of High-Power Sub-Nanosecond Pulses // *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 4 / Ed. Heyman E., Mandelbaum B., Shiloh J. N.Y.: Plenum*, 1999. P. 1.
39. *Yalandin M.I., Luybutin S.K., Rukin S.N. et al.* Formation of Nano- and Subnanosecond Width High-PRF Powerful Voltage Pulses by Using a Hybrid Modulator Schemes // *Proc. 13th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia. 25–29 July. 2004*. P. 153.
40. *Koshelev V.I., Gubanov V.P., Efremov A.M. et al.* High-Power Ultrawideband Radiation Source with Multielement Array Antenna // *Proc. 13th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia. 25–29 July. 2004*. P. 258.
41. *Сахаров К.Ю.* Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров. М.: Моск. гос. ин-т электр. и мат., 2006. 159 с.
42. *Fedorov V.M., Efanov M.V., Ostashev V.Ye., Tarakanov V.P., Ul'yanov A.V.* Antenna Array with TEM-Horn for Radiation of High-Power Ultra Short Electromagnetic Pulses // *Electronics*. 2021. V. 10. № 9. P. 1011.
43. *Тараканов В.П.* Универсальный электромагнитный код КАРАТ // *Математическое моделирование: Проблемы и результаты / Под ред. Макарова И.М., Белоцерковского О.М. и др. М.: Наука*, 2003. С. 456.
44. *Марков Г.Т., Сазонов Д.М.* Антенны. 2-е изд. М.: Энергия, 1975. 528 с.
45. *Фортв В.Е.* Мощные ударные волны на Земле и в космосе. М.: Физматлит, 2019. 412 с.